

## РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

**Д.В. Потоцкий студент; В. И. Милых проф., д.т.н.**

*(Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
г. Харьков, Украина)*

Основные процессы в электрических машинах (ЭМ) осуществляются через магнитное поле (МП). С развитием вычислительных средств стало возможным облегчить непосредственный расчет МП, а также проводить его с большей точностью [1].

Численные расчеты МП в ЭМ могут эффективно проводиться методом конечных элементов (МКЭ). Существуют программы, которые позволяют это сделать как в двухмерной, так и трехмерной постановке.

Целью данной работы является сравнение параметров обмотки статора турбогенератора (ТГ), полученных классическим методом - методом магнитной цепи (ММЦ) [2] и численно-полевым методом на двухмерной модели [3]. В качестве объекта для исследования принят ТГ типа ТГВ-340-2ПЗ полной номинальной мощностью 400 МВ·А на номинальное напряжение обмотки статора  $U_{Nl} = 20$  кВ и номинальный ток  $I_{N\phi} = 11550$  А. Данный ТГ имеет число пар полюсов  $p=1$ , диаметры статора наружный  $d_{se}=2,5$  м и внутренний  $d_s=1,275$  м, количество пазов статора  $Q_s=30$ , воздушный зазор  $\delta=77,5$  мм.

Графически модель ТГ реализуется в программе КОМПАС V9 с последующим импортированием файла в формате dxf в среду программы FEMM [3]. Эта программа реализует на основе МКЭ уравнение, описывающее МП (в нашем случае – в поперечном сечении ТГ):

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z,$$

где  $A_z, J_z$  – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и вектора плотности тока;  $\vec{k}$  – орт;  $\mu$  – магнитная проницаемость, которая определяется как функция магнитной индукции  $B$  посредством кривой намагничивания материала (использовалась кривая намагничивания стали 3414 для статора и Ст3-для ротора, а также учитывались коэффициенты заполнения шихтованных сердечников статора и ротора). Для ВМП задано граничное условие Дирихле [1].

Для того чтобы определить электромагнитные параметры обмотки статора, необходимо рассчитать ее МП. При симметричной нагрузке ТГ его фазные токи образуют симметричную трехфазную систему.

$$i_A = I_m \cos(\omega t - \beta); \quad i_B = I_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \beta); \quad i_C = I_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \beta),$$

где  $I_m = \sqrt{2} I_s$  – амплитудное и  $I_s$  – действующее значения фазного тока;  $t$  – время;  $\beta$  – начальная фаза;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $f$  – частота.

Расчеты МП в стационарных режимах желательно проводить для конкретных мгновенных значений тока в обмотке статора. Для наиболее простого варианта:  $t=0$  и  $\beta=0$ , то МДС фазной обмотки  $A-A'$ , как и трехфазной обмотки в целом, будет ориентировано практически по продольной оси. При расчете поля в фазной обмотке  $A-A'$  задавалось мгновенное значение тока  $i_A = I_m = 7156$  А, в фазных обмотках  $B-B'$  и  $C-C'$  задавалось мгновенное значение  $i_B = i_C = -0.5 I_m = -3578$  А (рис.1).

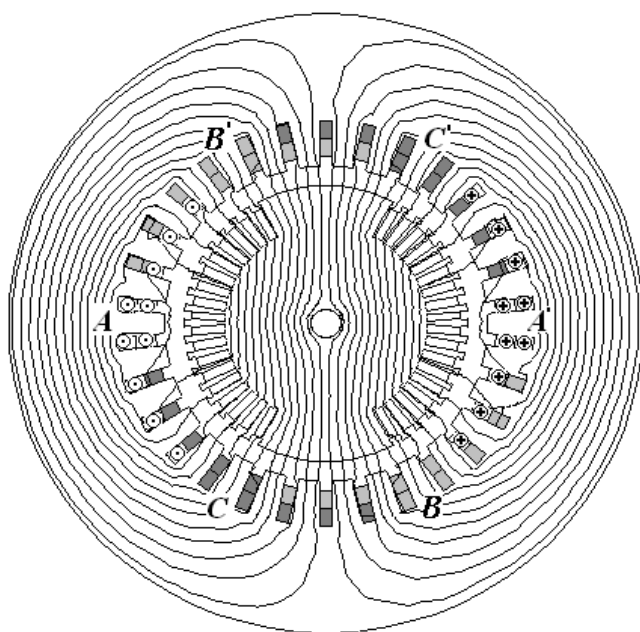


Рисунок 1 - Картина магнитного поля трех фаз обмотки статора по продольной оси d

Но в теории синхронных машин представляет интерес ориентации МП по поперечной оси. Для расчета такого режима все сохраняется, как и в предыдущем случае, достаточно только ротор повернуть на 90 электрических градусов (рис.2).

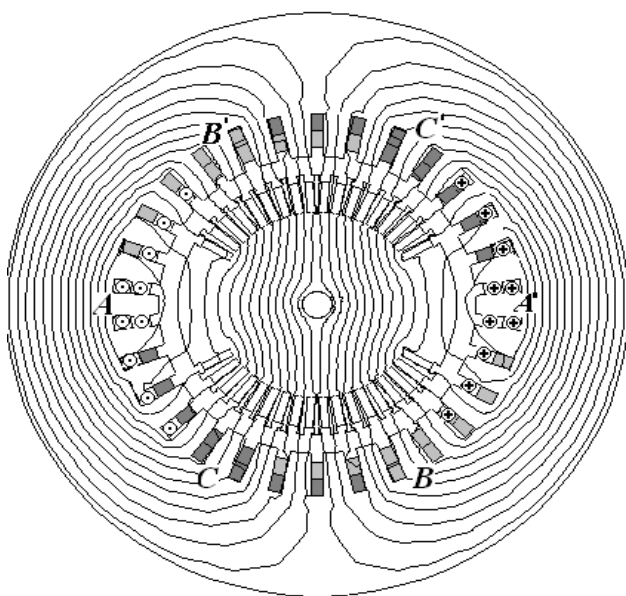


Рисунок 2 - Картина магнитного поля трех фаз обмотки статора по поперечной оси q

шим допущениям численного метода расчета МП по сравнению с классическим методом. Погрешность последнего здесь оценивается в 5...7%, что необходимо учитывать при проектировании и исследовании ЭМ.

В результате расчета получено распределение ВПМ. Аппаратным методом в FEMM [1] рассчитана амплитуда магнитного потокосцепления  $\Psi_{am} = 51.93$  Вб. Далее найдено значение полной индуктивности фазы:

$$L_a = \frac{\Psi_{am}}{I_{am}} = \frac{51.93}{7156} = 0.00726 \text{ Гн}$$

и ее синхронное индуктивное сопротивление:

$$x_d = 2\pi f L_a = 2.28 \text{ Ом};$$

$$x_d^* = \frac{x_d}{z_N} = \frac{2.28}{1} = 2.28 \text{ о.е.},$$

где  $z_N$  - полное сопротивление ТГ

$$z_N = \frac{U_{N\phi}}{I_{N\phi}} = 1 \text{ Ом}.$$

Результаты расчета МП по поперечной оси приведены ниже:

$$L_a = \frac{\Psi_{am}}{I_{am}} = \frac{49.98}{7156} = 0.00698 \text{ Гн}$$

$$x_q = 2\pi f L_a = 2.194 \text{ Ом}$$

$$x_q^* = \frac{x_q}{z_N} = \frac{2.194}{1} = 2.194 \text{ о.е.}$$

Сравнивая результаты двух расчетов, становится очевидным, что синхронные индуктивные сопротивления практически идентичны. Это соответствует общепринятой теории ЭМ. Однако численный метод показывает их реальное отличие. При расчете классическим методом синхронное индуктивное сопротивление составило  $x_{c3}^* = 2.43$  о.е. Очевидное уточнение произошло благодаря гораздо мень-

**Список литературы:** 1. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехника і електромеханіка.-2006.-№2.-С.40-46. 2. Вольдек А.И. Электрические машины. -Л.: Энергия,-1978.-832 с. 3. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.

## АНОТАЦІЯ

**Д.В. Потоцький студент; Міліх В.І., проф., д.т.н. Розрахунок індуктивних опорів обмотки статора турбогенератора.**

Вирішується задача розрахунку магнітного поля та електромагнітних параметрів турбогенератора. Подається порівняння результатів розрахунків індуктивних опорів обмотки статора по повздовжній та по поперечній осі на основі використання польового підходу за допомогою програми FEMM (що розташована на сайті <http://femm.berlios.de>) та традиційного розрахунку індуктивних опорів.